

УДК 004:62-529

DOI 10.17513/snt.39943

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

Калинин В.Ф., Погонин В.А.

ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет, Тамбов,

e-mail: vfkalinin@rambler.ru

Аннотация. Исходные ингредиенты, продукция производств с химическими технологиями способны образовывать взрывоопасную смесь, обладать мутагенными или канцерогенными свойствами, коррозионной активностью. Эти свойства исходных ингредиентов, продукции определяют множество участков с экстремальными условиями труда обслуживающего персонала. Рассматриваются вопросы автоматизированной системы проектирования роботизированных автоматизированных систем управления химическими производствами. Предлагается методология автоматизированного проектирования, включающая этапы: определение целей и задач управления; разработка адекватной имитационной модели исследования; создание математического обеспечения синтеза программ управления подсистем автоматизированных систем управления технологическими процессами и роботов-лаборантов; определение технического задания и погрешности математической модели, прогноза возмущающих воздействий, идентификации состояния, выбора наиболее эффективных роботизированных автоматизированных систем управления оценки целесообразности использования этой системы. Целью являлось создание теоретических основ методологии и алгоритмов проектирования роботизированных автоматизированных систем управления химическими производствами. Методы: математическое моделирование современной теории управления, математическая статистика. Разработаны теоретические положения методологии автоматизированного проектирования различных типов подсистем роботизированных автоматизированных систем управления, имитационная модель исследования, с помощью которой можно получить адекватный вывод о целесообразности использования тех или иных роботизированных автоматизированных систем управления химическими производствами. Создано математическое обеспечение синтеза программ управления подсистем автоматизированных систем управления технологическими процессами и роботов-лаборантов. Результаты, полученные в данном исследовании, подтверждают результаты исследований технологического процесса производства азопигментов.

Ключевые слова: химические производства, роботизированные системы управления

METHODOLOGY DESIGNING ROBOTIC AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR CHEMICAL PRODUCTION

Kalinin V.F., Pogonin V.A.

Tambov State Technical University, Tambov, e-mail: vfkalinin@rambler.ru

Annotation. The initial ingredients and products of industries with chemical technologies are capable of forming an explosive mixture, having mutagenic or carcinogenic properties, and corrosive activity. These properties of the initial ingredients and products determine many areas with extreme working conditions for maintenance personnel. The issues of an automated design system for robotic automated control systems for chemical industries are considered. The methodology of computer-aided design is proposed, which includes the following stages: determination of management goals and objectives; development of an adequate simulation model of research; creation of mathematical support for the synthesis of control programs for subsystems of automated process control systems and laboratory robots; determination of technical specifications and errors of the mathematical model, prediction of disturbing influences, identification of the state, selection of the most effective robotic automated control systems for evaluation the expediency of using this system. The aim is to create the theoretical foundations of methodology and algorithms for the design of robotic automated control systems for chemical industries. Methods: mathematical modeling of modern management theory, mathematical statistics. The theoretical provisions of the methodology of computer-aided design of various types of subsystems of robotic automated control systems, a simulation model of research have been developed, with the help of which it is possible to obtain an adequate conclusion about the expediency of using certain robotic automated control systems of chemical industries. Mathematical support for the synthesis of control programs for subsystems of automated process control systems and robotic laboratory assistants has been created. The results obtained in this study confirm the results of studies of the technological process of azopigment production.

Keywords: chemical production, robotic control systems

Химическая промышленность относится к областям промышленности, характеризующимся наиболее экстремальными условиями труда. Загазованность и запыленность помещений, антисанитарные условия, токсичность веществ делают работу

на химических производствах чрезвычайно тяжелой и опасной. Даже малейшие концентрации некоторых газов или контакт с жидкими продуктами производства часто весьма опасны для здоровья, а иногда для жизни персонала [1].

Загазованность помещений, коррозионная опасность, взрывопожароопасность помещений препятствуют применению промышленных роботов массового производства. Многочисленность и разнообразие конструкций аппаратов, специфичность и разнообразие работ на химико-технологических производствах являются препятствиями для создания типовых серийных роботов, специально предназначенных для химических производств.

Наличие в производственной среде мутагенных и канцерогенных соединений указывает на необходимость систематического мониторинга загрязнений, гигиенических оценок рабочих мест с помощью роботов-лаборантов [1].

Работы по автоматизированному проектированию систем автоматического управления химическими производствами [2–4], хотя и получили довольно широкое развитие, но не могут непосредственно быть применимыми для проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) с использованием роботов-лаборантов. Например, необходимо учитывать задание на частоту и длительность отбора проб среды, оценивать точность и частоту коррекции математического обеспечения, отсутствие алгоритмов планирования работы коллективов роботов-лаборантов в условиях помех, алгоритмов расчета и оптимизации траекторий роботов-лаборантов в условиях нормальной эксплуатации [5]. С этой целью было проведено исследование по созданию теоретических основ методологии и алгоритмов проектирования роботизированных автоматизированных систем управления химическими производствами.

Материалы и методы исследования

В работе использовались методы математического моделирования современной теории управления, математическая статистика.

Результаты исследования и их обсуждение

Представим методологию автоматизированного проектирования роботизированных автоматизированных систем управления (РоАСУ) в виде выполнения следующих этапов.

Этап 1. Создание РоАСУ начинается с определения целей и задач будущей системы управления технологическим объектом. Обычно цели управления формулируются в виде некоторой (часто векторной) целевой функции, минимизации в смысле принятого отношения порядка. Однако довольно ча-

сто целью управления является нахождение управляющих воздействий (или программ управления) на интервале $[0, T]$, при которых удовлетворяются (иногда с заданной вероятностью) системы технических и технологических ограничений и условий.

Математически в общем случае эти задачи управления могут быть формализованы в следующем виде: необходимо найти $u^* \in U$, при которых удовлетворяются с заданной вероятностью технологические ограничения и условия:

$$\text{Вер } \{ \mu_j(f, y, u) \geq \alpha_j \} \geq P_j, j = \overline{1, r}, \quad (1)$$

$$v(f, y, u^*) \geq \beta, \quad (2)$$

где $y = M(f, y, u)$, $f \in F_0 \subset F, y \in Y_0 \subset Y$, Вер – обозначение вероятности, P – предельное значение вероятности, M – оператор математической модели, используемый в алгоритме оптимизации, v – вектор целевой функции.

Этап 2. На этом этапе разрабатывается имитационная модель, позволяющая исследовать функционирование различных типов РоАСУ и традиционных АСУТП, рассчитывать для различных постулированных на первом этапе задач и целей управления вероятности выполнения технических и технологических ограничений и условий.

Рассмотрим требования к имитационным моделям и их свойствам. Имитационные модели должны быть: достаточно точными, чтобы с их помощью возможно было бы получить адекватный вывод о целесообразности использования РоАСУ; должны учитывать воздействие внутренних случайных помех, влияющих на изменение состояние объекта; они должны позволять имитировать работу РоАСУ и влияние погрешностей на установку управляющих воздействий и в работе РоАСУ на экономические показатели функционирования системы.

Обозначим имитационную модель в виде оператора \tilde{M} , который представляет собой отображение:

$$\tilde{M} : Y_0 \times F \times U \times V \rightarrow Y \quad (3)$$

где F, U, V, Y, Y_0 – пространства соответственно возмущений, управляющих воздействий, случайных помех, выходных величин (состояний) объекта, начальных состояний (т.е. состояний объекта в начальный момент времени).

При имитации работ РоАСУ, кроме функций y, f, u, v , необходимо рассмотреть сужение этих функций на интервале $[t_0, t]$, $[t, T]$, $t, t' \in [t_0, T]$.

Примем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}\chi_t &= \chi(\tilde{t}) \mid \tilde{t} \in [t, T]; \\ \chi^t &= \chi(\tilde{t}) \mid \tilde{t} \in [t_0, t]; \\ \chi_t^t &= \chi(\tilde{t}) \mid \tilde{t} \in [t', t''], t', t'' \in [t_0, T]; \\ \chi_t^t &= \chi(\tilde{t}) \mid \tilde{t} \in [t', T], t' \in [t_0, T],\end{aligned}\quad (4)$$

где χ – обозначение функций, определенных на $[0, T]$, т.е. χ – любая из функций y, f, u, v .

Для суженных функций имитационная математическая модель будет представлять собой оператор, действующий на декартовом произведении пространств суженных функций:

$$\begin{aligned}\tilde{M}_\tau &: F_\tau \times U_\tau \times V_\tau \times Y_0 \rightarrow Y_\tau \\ \tilde{M}^\tau &: F^\tau \times U^\tau \times V^\tau \times Y_0 \rightarrow Y^\tau \\ \tilde{M}_\tau^t &: F_\tau^t \times U_\tau^t \times V_\tau^t \times Y_0 \rightarrow Y_\tau^t\end{aligned}\quad (5)$$

При этом математическая модель для суженных функций записывается в виде:

$$Y_\tau = \tilde{M}(f_\tau, u_\tau, v_\tau, y_\tau(\tau)), \quad (6)$$

– эта модель определяет функцию $y_\tau(t)$ для всех $t \in [\tau, T]$;

$$Y^\tau = \tilde{M}(f^\tau, u^\tau, v^\tau, y_0)$$

– эта модель определяет функцию $y^\tau(t)$ для всех $t \in [t_0, \tau]$;

$$Y_\tau^t = \tilde{M}(f_\tau^t, u_\tau^t, v_\tau^t, y_\tau^t(\tau'))$$

– эта модель определяет функцию $y_\tau^t(t)$ для всех $t \in [\tau', \tau'']$.

Будем считать, что оператор \tilde{M} удовлетворяет принципу согласования, т.е.:

$$\lim_{t \rightarrow \tau} y^\tau(t) = y_\tau(t) \quad (7)$$

$$y_\tau^t = \tilde{M}(f_\tau^t, u_\tau^t, v_\tau^t, \tilde{M}(f_\tau^t, u_\tau^t, v_\tau^t, y_\tau^t(\tau'))), \quad (8)$$

где $\tau \leq \tau \leq \tau, \tau', \tau'' \in [0, T]$.

Правило согласования является требованием состыковки функций на отдельных участках траекторий.

Математическую модель вида (6) в соответствии с (5), удовлетворяющую правилам согласования (7), (8) и включающую в себя влияние случайных факторов $v \in V$, будем называть имитационной моделью.

Этап 3. Проверка адекватности имитационной модели по данным эксперимента. Этот этап позволяет установить точность имитационной модели и надежность получаемых с ее помощью выводов. В настоящее время существуют многочисленные методы и достаточно развитая теория, позволяющая оценить адекватность различных

математических моделей технологических процессов [1].

Этап 4. На данном этапе предварительно определяется техническое задание на подсистемы PoACU, при этом определяется задание на точность и быстродействие математического обеспечения проектируемой PoACU (в том числе на точность и на скорость сходимости математических моделей, используемых для целей управления), на быстродействие и точность идентификации состояния роботами-лаборантами, на точность исполнительных устройств и т.п.

Рассмотрим оптимизацию технического задания на подсистемы PoACU.

Задание интервала времени ΔT_i между отборами проб для их последующего анализа с целью коррекции математических моделей определяет необходимую скорость работы подсистемы роботов-лаборантов, а значит, их тип и необходимое число роботов, предельно допустимое время задержек в реализации управлений, быстродействие алгоритмов расчета математической модели, алгоритмов прогноза изменения возмущающих воздействий, расчета программ управления, коррекции коэффициентов математической модели, прочность распределения ошибок в измерении возмущающих воздействий и состояния объекта определяет необходимую точность работы роботов-лаборантов и исполнительных устройств.

Таким образом, определение целесообразных или оптимальных значений интервалов времени между взятиями проб ΔT_i , допустимых задержек Δt_i в реализации управляющих воздействий, плотностей распределения ошибок Δf_i в измерении возмущающих воздействий,

Δu_i в измерении состояния системы и Δv_i в установке управляющих воздействий позволяет сформулировать техническое задание на PoACU в части требований к быстродействию подсистемы роботов-лаборантов, быстродействию программного обеспечения, точности работы подсистемы роботов-лаборантов и системы реализации управляющих воздействий.

Назовем абсолютно идеальной системой оптимизации (E -системой) такую ACUTП, при которой возмущающие воздействия f, v известны полностью на интервале $[t_0, T]$ и состояние y точно прогнозируется математической моделью.

Таким образом, E -система – это система, решающая следующую задачу.

Для заданных на $[t_0, T]$ возмущающих воздействий f, v и начальном состоянии y_0 найти определенную на $[t_0, T]$ функцию u^* , при которой принимает минимальное значение функционал:

$$q(f, v) = \mu(f, y, u), \quad (9)$$

при выполнении условий и ограничений:

$$\varphi_j(f, y, u) \geq \alpha_j, j = 1, \dots, r,$$

$$\text{где } y = M(f, u, v, y_0). \quad (10)$$

Показатель эффективности q_E такой системы может быть определен по формуле:

$$q_E^* = \int \int_{FV} \phi(f, y^*, u^*) P_v(dv) P_f(df), \quad (11)$$

где u^* – решение задачи для заданных f и v , y^* определяется для известных f и v , y_0 по (10).

Очевидно, что для РоАСУ система E наиболее эффективна среди всех возможных систем управления при оценке их эффективности показателей по (9). Эта система характеризуется наименьшим значением (11) и в этом смысле может называться абсолютно оптимальной системой управления.

Абсолютно оптимальная система E , естественно, недостижима, однако показатель (11) может служить оценкой приближения исследуемой системы управления к абсолютному.

Этапы 5, 6. Представляют собой создание математического обеспечения подсистемы выработки программы управления технологическим процессом АСУТП. При этом этап 5 заключается в разработке математической модели для цели управления, удовлетворяющей требованиям технического задания этапа 4, этап 6 – создание и исследование алгоритмов управления, удовлетворяющих требованиям технического задания этапа 4. Проверка адекватности математической модели M , предназначенной для управления, проверки удовлетворения технического задания модели M на точность, может производиться как по экспериментальным данным, так и по данным имитационной модели \bar{M} , имитирующей с достаточной точностью поведение объекта под действием случайных внутренних и внешних факторов и построенной на этапе 2. Если условия работ не экстремальны, необходимо обоснование возможности и целесообразности использования традиционных АСУТП. Эти обоснования проводятся с использованием имитационных моделей и алгоритмов имитационного исследования на этапе 7.

Этап 7. Имитация работы системы управления без использования средств робототехники (в принятой терминологии АСУТП). Имитационные исследования АСУТП позволяют выявить зависимость мгновенного показателя эффективности $v(f, y, u^*)$ от влияния входных возмущающих воздействий f , вариации этих показателей в зависимости

от изменения внутренних случайных факторов v , определить среднее значение показателя эффективности \bar{q} .

Среднее значение \bar{q} , в общем случае, представляет собой вектор показателей, характеризующий производительность, качество и себестоимость продукции и т.п. Рассчитанный с помощью алгоритмов имитационных исследований показатель \bar{q} сравнивают с предельно допустимыми $q_{зад}$:

$$\bar{q}_i \geq q_{зад i}, i = \overline{1, S}. \quad (12)$$

В случае невыполнения (12) применение робототехнических систем нецелесообразно, поскольку условия работы не являются экстремальными. В том случае, если условия работы экстремальные, переходят к этапу 8.

Этап 8. Этап заключается в выборе множества вариантов РоАСУ, подлежащих дальнейшему исследованию с целью выбора из них экономически целесообразного варианта. Задача этапа – сузить множество возможных вариантов, отсеять заведомо неприемлемые варианты, создать тем самым минимальное число альтернативных вариантов, требующих дальнейшего рассмотрения. При отсеивании вариантов используются различные эвристические правила. Эвристические знания представлены в виде продукции [2] и применяются в экспертной системе при интерактивном формировании множества альтернативных вариантов РоАСУ.

Этап 9. На этом этапе с помощью имитационной модели имитируется работа идеальной (работающей без ошибок) РоАСУ R и определяются показатели эффективности ее работы. Невыполнение условий

$$\bar{q}_{Ri} \geq q_{зад i}, i = \overline{1, S}. \quad (13)$$

означает, что даже в том случае, если система R работает без ошибок, ее показатели эффективности ниже заданных, так как у реальной системы, работающей с ошибками, показатели эффективности будут не выше, чем у идеальной системы R , и дальнейшее исследование системы R прекращается.

Этап 10. Из множества реальных роботов и вспомогательных устройств комплектуется парк роботов, способных выполнять необходимый объем работы, и проводится оптимальное распределение работы между коллективом роботов.

Если возможности для проектирования новых устройств нет, вариант системы R отбрасывается, переходят к исследованию нового варианта. В противном случае переходят к этапу 11.

Этап 11. Разработка, изготовление опытных образцов и исследование новых робо-

тотехнических устройств, приспособлений, роботов-лаборантов. При этом необходимо учитывать возможность и целесообразность изменения химических аппаратов и их компоновок с целью упрощения их обслуживания коллективом роботов-лаборантов.

Этап 12. На этом этапе проводится расчет оптимальных траекторий движения роботов, гарантирующих минимальные энергозатраты или максимальное быстродействие, и задается вероятность отсутствия столкновений между роботами и между звеньями манипуляторов роботов.

На этом этапе имитационному исследованию подвергается реальная (работающая с ошибками) система R^{δ} , при этом проверяется выполнение неравенства:

$$\bar{q}_{Ri}^{\delta} \geq q_{за\delta i}, i = \overline{1, S}. \quad (14)$$

Невыполнение (14) означает, что, хотя идеальная система работает достаточно эффективно, ошибки в работе реальной системы настолько уменьшают эффективность, что она становится недопустимо малой. В этом случае система R отбрасывается.

Так как идеальная система удовлетворяет условиям (14), задача, решаемая на этом этапе, математически разрешима. Однако эта задача может не иметь технического либо стоимость внедрения адекватной техники или ее разработки может оказаться недопустимо большой. В этом случае дальнейшие исследования системы R прекращаются.

В противном случае система R заносится во множество допустимых робототехнических систем.

Выбор из этого множества целесообразной системы осуществляет оператор-эксперт на основе сроков окупаемости и технико-экономических показателей системы R . Выбор целесообразной системы происходит в диалоговом режиме проектирования с помощью интеллектуальных систем.

В том случае, если допустимой системы R не найдется, проектировщик либо принимает решение использовать традиционную АСУТП, либо вносит рекомендации по целесообразности увеличения средств на разработку новой, более дешевой и эффективной системы роботов.

В аналогичных системах при экстремальных условиях труда эти рекомендации приобретают характер требований.

Заключение

Разработаны теоретические положения методологии автоматизированного проектирования различных типов подсистем РоАСУ, имитационная модель исследования, с помощью которой можно получить адекватный вывод о целесообразности использования РоАСУ. Создано математическое обеспечение синтеза программ управления подсистем АСУТП и роботов-лаборантов. Результаты, полученные в данном исследовании, подтверждают результаты исследований технологического процесса производства азопигментов.

Список литературы

1. Калинин В.Ф., Погонин В.А. Планирование работы коллектива роботов-лаборантов // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 9. С. 20-24.
2. Назаров А.В., Рыжова Т.П. Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 6. С. 93-105.
3. Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. М.: Физматлит, 2015. 305 с.
4. Shuo Yang, Xinjun Mao, Sen Yang, Zhe Liu. Towards a hybrid software architecture and multi-agent approach for autonomous robot software // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. Vol. 14. Is. 4. DOI: 10.1177/1729881417716088.
5. Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В. Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладке и оптимизации маршрутов в среде с препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 3(176). С. 127-143.